

楔横轧铝合金轧件内部空洞演变

崔丽华 王宝雨[✉] 胡正寰

北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

[✉] 通信作者, E-mail: bywang@ustb.edu.cn

摘要 采用数值模拟的手段,研究了楔横轧轧制铝合金时轧件内部空洞演化的一般规律和工艺参数对空洞演化的影响.结果表明:轧件内部单空洞演化的一般规律是球形—椭球形—轧件内部轴向贯通的孔腔;多空洞演化时,位于轧件中心的空洞的变化规律和单空洞时相似,但其余位置的空洞发生了闭合,它们对中心空洞有正作用方面的影响;在模具的各个阶段中,楔入段的后期和展宽段的前期是内部空洞演化的关键阶段;在楔横轧加工的工艺参数方面,展宽角是影响空洞演化的最敏感因素,其次是断面收缩率,再次是成形角.研究证明了小的成形角、展宽角和断面收缩率均有利于轧件内部空腔的扩展.

关键词 楔横轧; 铝合金; 空洞; 有限元法

分类号 TG 335.19

Evolution of internal holes in aluminum alloy parts by cross wedge rolling

CUI Li-hua, WANG Bao-yu[✉], HU Zheng-huan

School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

[✉] Corresponding author, E-mail: bywang@ustb.edu.cn

ABSTRACT The general evolution rules of internal holes in aluminum alloy parts and the influence of process parameters on the internal holes in cross wedge rolling were studied by means of numerical simulation. The results show that the general evolution law of a single hole is firstly spherical, then ellipsoid, and finally a hole through the rolled piece at the axial direction. As for multi-holes, the evolution law of the center hole is similar to that of a single hole; however, holes lied in other positions finally become closed and have a positive effect on the center hole. The later segment of the knifing zone and the former segment of the stretching zone are the crucial evolution stage to the expansion of internal holes. Among the process parameters of cross wedge rolling, stretching angle is the most sensitive factor, followed by reduction in area and then forming angle. It is proved that the small forming angle, stretching angle and reduction in area are conducive to the expansion of internal holes.

KEY WORDS cross wedge rolling; aluminum alloys; cavitation; finite element method

铝合金的冶金过程决定了其内部不可避免地存在空洞型缺陷,这些内部空洞的存在破坏了金属的连续性,容易形成应力集中与裂纹损伤,导致工件的使用寿命缩短以致报废.铝合金内部空洞的产生主要有两方面的原因^[1]:一是冶金过程中,由于空气以及炉气的进入形成的内部气泡型空洞;二是凝固过程中产生的缩孔和疏松.为了提高工件的使用寿命,合理确定工件的加工工艺,就需要深入认识空洞的演化规律,探索提高空洞压实的条件,为实际生产提供理论指导.

目前对空洞的研究比较少. Keife 和 Stahl-

berg^[2]应用上限法对塑性变形时空洞的闭合过程进行了理论研究,发现轧件心部的压力对于空洞的闭合起着重要作用.张效迅和崔振山^[3]基于细观塑性理论和胞模型,建立了大锻件高温成形过程中内部空洞闭合的 Z-C 判据.任运来等^[4]研究了大型锻件锻粗工序中锻坯内部球形空洞的闭合情况.结果表明,随着空洞体积的减小,远场应力、应变迅速增大,仅靠远场应力的增大使空洞闭合是非常困难的,因此大锻件不可避免地存在未闭合的微小空洞. Tanaka 等^[5]应用刚塑性有限元法研究了锻件内部空洞的闭合,认为空洞周围的等效应变和静水压力

的作用是导致空洞闭合的直接因素. 北京科技大学韩静涛等^[6]指出缺陷修复速度对加热温度有依赖作用, 延长保温时间对孔穴性缺陷的修复有一定的促进作用. 北京机电研究所朱明和金泉林^[7]进行了大型锻件压实研究, 对椭球空洞的闭合规律进行了数值分析, 指出静水压力、等效应力和材料应变敏感系数是影响空洞闭合的主要因素, 在此基础上制定了大型锻件的锻造工艺.

总结国内外的文献^[8-11]可以看出, 目前对空洞的研究主要使用物理模拟和数值模拟两个手段. 数值模拟具有模拟速度快、费用低廉等优点, 特别适合于材料非线性、几何非线性和边界条件非线性等场合, 还可以模拟较多典型工况下的空洞闭合过程, 进而全面分析空洞的演化规律, 因此数值模拟是一种有效的方法.

本文使用数值模拟的方法, 从宏观大空洞在楔横轧加工中的演变着手, 分析了楔横轧加工铝合金轧件时空洞的演化规律和各种工艺参数对空洞的影响, 得出了定性结论, 揭示了轧件内部空洞的演化过程, 为合理地制定铝合金的楔横轧工艺提供了参考.

1 楔横轧带洞铝合金有限元模型的建立

楔横轧加工是一种高温高效高精度的加工, 加工时零件的变形既有径向压缩和轴向延伸, 又存在横向扩展, 不但存在材料非线性、几何非线性, 而且其边界条件也很复杂. 根据楔横轧工艺的特点, 本文的有限元数值模拟作如下假设.

(1) 轧辊视为刚体, 轧件视为刚塑性体, 忽略弹性变形, 只考虑塑性变形. 这是因为弹性变形的变形量很小, 对轧制过程的影响较小, 可以忽略.

(2) 两个轧辊的速度在成形过程中设置为恒定, 轧制条件对称.

(3) 轧件与模具的接触部分的摩擦模型选择剪切模型, 假定轧辊与轧件所有接触部分的摩擦因数相同.

(4) 通过固定的传热系数来反映轧辊、轧件和环境之间存在的热传导变化.

数值模拟所需几何模型在 Pro/ENGINEER 软件中建立, 考虑到结构的对称性, 只建立一半几何体, 然后按 stl 格式输出到 DEFORM 软件的前处理器. 有限元模拟使用的网格划分为四面体单元网格. 由于空洞主要发生在中心部位, 因此对轧件中心部位进行了网格加细划分. 本文模拟和分析过程中使用的坐标系如图 1 所示.

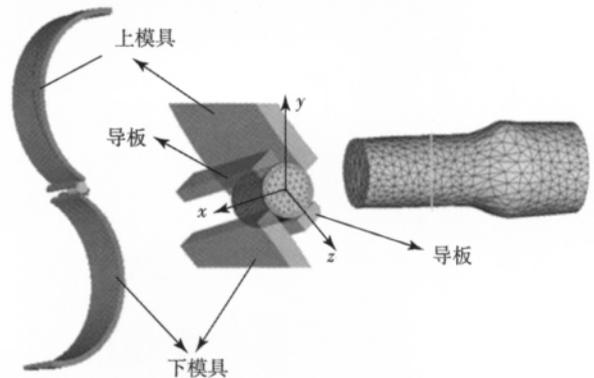


图 1 带洞铝合金轧件楔横轧有限元模型

Fig. 1 Finite element model of an aluminum alloy part with holes in cross wedge rolling

2 楔横轧铝合金时单空洞演变的一般规律

本文对变形温度为 $480\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、成形角为 28° 、展角为 8° 和断面收缩率为 60% 的单空洞铝合金轧件的楔横轧轧制过程进行了数值模拟. 取轧件的中心点作为特征点, 以空洞内距离最远的两点之间的长度(孔长)作为衡量尺度(如图 2 所示), 讨论空洞的演化规律.

在楔入段的开始(第 20 工步之前), 由于变形未渗入到中心, 空洞特征点没有发生变形, 三个方向的应力、剪应力都没有发生变化, 如图 3 和图 4 所示. 轧件的应变仅发生在与模具接触的局部, 中心部位的应变为零.

随着楔入的进行(第 20 工步到第 40 工步), 空洞的形状发生了变化, 孔长达到了 2.4 mm . 空洞在轴向方向上发生了扩展; 横截面方向上变为多边形, 边缘部分被钝化, 发生了闭合现象. 从图 3 中三向

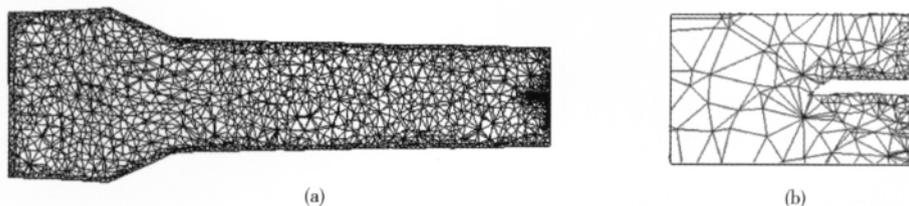


图 2 空洞的纵截面形状. (a) 轧件; (b) 空洞

Fig. 2 Longitudinal section shape of a hole: (a) workpiece; (b) hole

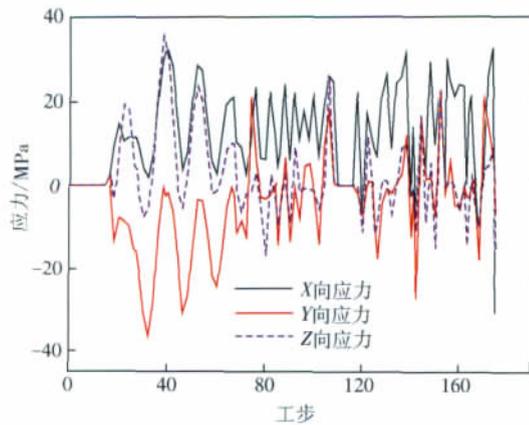


图 3 轧件特征点的应力

Fig. 3 Stresses at the feature point in a workpiece

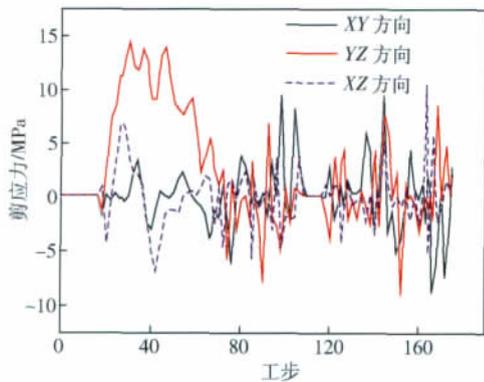


图 4 轧件特征点的剪应力

Fig. 4 Shear stresses at the feature point in a workpiece

应力来看: X、Z 方向均为拉应力, 分别达到了 32.2 MPa 和 35.2 MPa, 说明空洞在这两个方向发生了扩展; Y 向为压缩应力, 为 -36.6 MPa, 说明空洞在这个方向发生了闭合. 在剪应力方面, 如图 4, 三个方向的剪应力均发生了交变变化, 横向方向 (YZ 方向) 的剪应力变化最剧烈, 最高达到了 14.3 MPa.

展宽段的开始阶段 (第 40 工步到第 60 工步), 在轴向方向上, 空洞剧烈扩展, 孔长发展成为 4.57 mm, 被迅速拉长; 在横截面方向上, 空洞进一步闭合. 从应力图看 (图 3、图 4), 三向应力和三向剪应力均下降, 最大的轴向应力 (X 向) 达到 28.6 MPa, 横向方向 (YZ 方向) 的剪应力最大为 11 MPa.

展宽段的后继阶段和精整段 (第 60 工步以后), 特征点在轴向方向始终受拉应力, 另外两个方向受交变的拉、压应力. 无论在轴向或横向, 空洞的形状变化很小, 不再有剧烈的扩展或闭合. 从应力图看 (图 3 和图 4), 三向应力和三向剪应力都出现了幅度小的交变现象, 轴向应力最大达到 25.6 MPa, YZ 方向 (横截面方向) 的剪应力最大为 8.3 MPa.

模拟发现: 空洞演化的关键阶段是楔入段的后

期和展宽段的前期, 演变的主要原因是轴向拉应力和横截面方向上的剪应力. 前者导致了空洞的轴向扩展, 后者引起的扭转加剧了空洞的扩展. 空洞的形状变化规律为由球形变为椭球形, 最后发展为在轧件内部轴向贯通的孔腔; 横截面形状演变为多边形形状并有闭合的趋势. 从整个变化的过程看, 轧件的特征点在轴向 (X 方向上) 总是受拉应力, 在本方向上难以闭合. 分析表明模具的楔入段不宜过长.

3 楔横轧轧制铝合金时多空洞演变的一般规律

为了得到楔横轧轧制铝合金轧件时多空洞的演化情况, 本文对带有三个空洞的轧件进行了模拟实验. 模拟采用的变形温度为 480 °C, 成形角为 28°, 展宽角为 8°, 断面收缩率为 60%. 三个空洞的位置如图 5 所示, 特征点取为三洞的中心点.

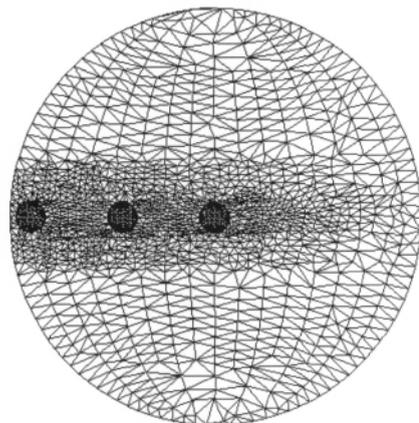


图 5 轧件中的多空洞

Fig. 5 Multi-cavities in a workpiece

分析轧件三洞特征点的应力场, 如图 6 和图 7 所示: 在楔入段 (第 40 工步以前), 三个空洞承受的轴向应力和横向剪应力相近, 在轴向上被拉长; 横截面方向变为多边形, 发生了闭合, 三洞的形状都产生了改变. 到展宽段 (第 40 工步以后), 中心空洞点受到的轴向拉应力明显大于另外两个空洞, 并且总是处于被拉伸状态. 这是因为它处于中间, 材料的流动向两边侧发展, 导致另外两个空洞发生被拉长、被闭合的交变状态. 随展宽长度的增加, 边缘空洞的应力振荡逐步减弱, 最后趋近于零, 边缘空洞最先闭合, 在轧制方向被压实; 随后中间空洞点也处于被拉伸、被压缩状态, 发展到一定程度, 中间空洞也闭合. 在整个过程中, 中心空洞点的轴向应力始终保持着一定的正振荡幅不变, 总是受拉伸应力, 难以闭合.

另外, 轧件上带有多空洞时, 在关键的展宽阶段

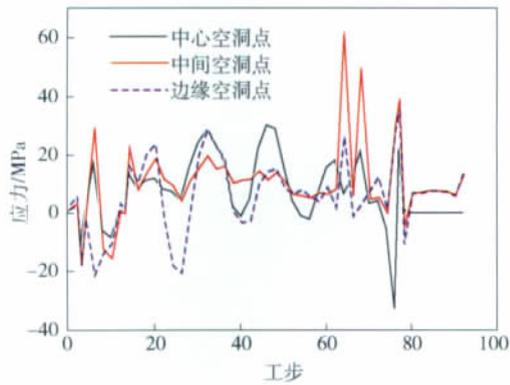


图 6 三洞特征点的轴向应力

Fig. 6 Axial stresses at three feature points in a workpiece

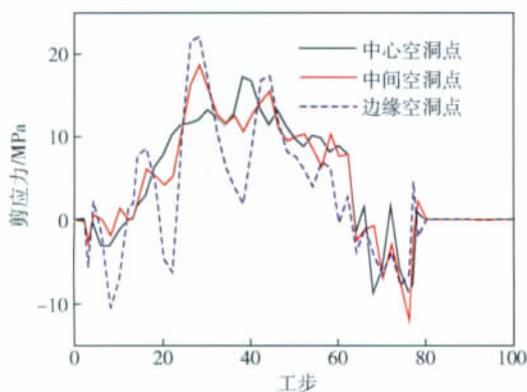


图 7 三洞特征点的横向(YZ向)剪应力

Fig. 7 Horizontal shear stress at three feature points in a workpiece

的前期,中心空洞承受的轴向应力小,仅为 25 MPa,比单空洞减少了 38%,因此存在多空洞时轧件中心贯通的空洞在尺寸上要小,这一点是由于多空洞的泄压作用所致。同时也说明了在多空洞情况下,位于非中心的空洞的存在可以抑制中心空洞发展。

数值模拟的结果表明:轧件内存在多个空洞时,中心空洞的形状变化与单空洞时相似,变形形式为球形,椭球形,最后发展为内部轴向贯通的孔腔;位于其他位置的空洞变为椭球形后,在轴向方向上,迅速发展为裂纹,然后发生了闭合(在本模拟条件下第 78 工步就发生了闭合),位置越接近外表面的空洞越容易闭合,不发生贯通现象。

进一步的研究表明:在同样的加工条件下,存在多空洞时,位于轧件心部的空洞最不容易闭合,其余部位的空洞对中心空洞有正作用面的影响,不会加深加大中心空洞的扩展,反而起阻止变大的作用;小尺寸空洞比大尺寸空洞更容易闭合。

4 工艺参数对空洞影响的数值模拟

为了深入分析楔横轧加工铝合金轧件时工艺参数对内部空洞演化的影响,本文安排了不同的数值

模拟实验。材料选择为铝合金,变形温度为 480 °C,摩擦因数为 0.4。模具的成形角分别选择 18°、22°、28°、30°和 34°,模具的展宽角分别选择 4°、6°、8°、10°和 12°,断面收缩率分别选择 51%、54%、58%、60%和 64%进行了正交模拟,模拟结果参见图 8。

不同成形角的模拟分析如下:随成形角的增大,在横截面方向,五种角度下的孔长尺寸差不多,分别由 3 mm 减小为 1.22、1.22、1.21、1.18 和 1.11 mm,形状都变成多边形;在纵截面,孔长尺寸分别由 3 mm 增大为 10.88、9.70、9.20、9.14 和 9.10 mm,34°的成形角的孔长尺寸比 18°降低了 22%,空洞都产生了轴向贯通。

不同展宽角的模拟分析如下:随展宽角的增大,在横截面方向,五种角度下轧制的轧件的内部空洞的孔长尺寸相差较多,分别由 3 mm 减小为 1.69、1.30、1.21、1.05 和 0.98 mm,形状也都变成多变形;在纵截面,孔长尺寸分别由 3 mm 增大为 9.48、9.36、9.20、8.70 和 8.40 mm,展宽角为 12°的轧件内部空洞比 4°时减少了 11%,空洞也都产生了轴向贯通。

不同断面收缩率的模拟分析如下:随断面收缩率的增加,在横截面方向,五种断面收缩率下的轧件的内部空洞的孔长尺寸相差较多,分别由 3 mm 减小为 1.40、1.38、1.29、1.21 和 1.17 mm,虽然形状都变成多变形,但孔长尺寸变化的百分数由 61% 下降到了 53%;在纵截面,孔长尺寸分别由 3 mm 增大为 10.22、9.60、9.20、9.14 和 8.76 mm,孔长尺寸的变化由 70% 下降到了 65%,空洞也都产生了轴向贯通。

分析结果表明:在同样的加工条件下,模具的成形角、展宽角,轧件的断面收缩率越小,越有利于内部空腔的发展,扩展越激烈。这是因为这三种工艺参数越小,越迫使更多的金属材料向轧件的两端头流动,促使早已经存在的空腔轴向扩展。因此在加工条件相同时,应采用大的成形角、展宽角和断面收缩率。

5 模拟结果讨论

综合上节的研究,为了判断楔横轧工艺的三种工艺参数对轧件内部空洞扩展的影响次序,本文采用单位变量加以分析,研究结果如下。

在纵截面:展宽角每变化一个单位变量,空腔尺寸变化 0.135;成形角每变化一个变量,空腔尺寸变化 0.111;断面收缩率每变化一个单位变量,空腔尺寸变化 0.112。

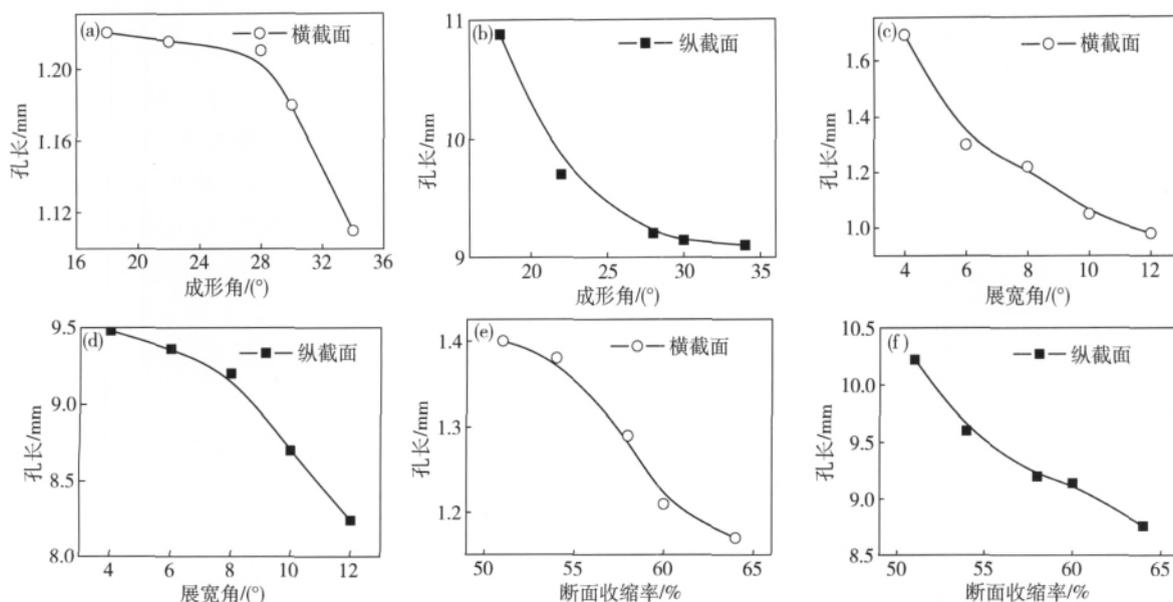


图 8 不同工况下的孔长尺寸。(a) 横截面孔长与成形角的关系; (b) 纵截面孔长与成形角的关系; (c) 横截面孔长与展宽角的关系; (d) 纵截面的孔长与展宽角的关系; (e) 横截面孔长与断面收缩率的关系; (f) 纵截面孔长与断面收缩率的关系

Fig. 8 Cavity size under different conditions. (a) relationship between cavity size on the cross section and forming angle; (b) relationship between cavity size on the longitudinal section and forming angle; (c) relationship between cavity size on the cross section and stretching angle; (d) relationship between cavity size on the longitudinal section and stretching angle; (e) relationship between cavity size on the cross section and reduction in area; (f) Relationship between cavity size on the longitudinal section and reduction in area

在横截面: 展宽角每变化一个单位变量, 空腔尺寸变化 0.0887; 成形角每变化一个变量, 空腔尺寸变化 0.00687; 断面收缩率每变化一个单位变量, 空腔尺寸变化 0.0177.

分析上述的数据表明: 在纵截面, 空腔的大小对展宽角更为敏感(0.135), 展宽角的变化更有助于空洞(包含疏松)或裂纹的扩展或钝化; 其次是轧件的断面收缩率(0.112), 再次是成形角(0.111); 在横截面, 空腔的大小也是对展宽角更为敏感(0.0887), 其次是断面收缩率(0.0177), 再次是成形角(0.00687).

从分析来看, 展宽角在空洞(包含疏松)或裂纹的演化中扮演着最重要的角色. 产生上述变化的原因是: 模具的前段展宽部分是轧件内部空洞演化的关键部分(本文的第 2 节论述过), 展宽角的大小决定了轧件受到的轴向应力和拉压、扭转次数, 影响着轧件的轴向扩展或径向变化, 是确定轧件受到的轴向应力和剪应力的关键因素.

上述数据还表明以下结论: 展宽角每变化一个单位变量, 空腔在纵截面的反应较剧烈, 表现在纵截面变化了 0.135, 而横截面仅变化了 0.08875, 说明展宽角对空洞(包含疏松)或裂纹的纵截面更敏感, 展宽角的变化更有助于空洞(包含疏松)或裂纹的纵向扩展或闭合; 成形角每变化一个单位变量, 空腔

在纵截面的反应较剧烈, 表现在纵截面变化了 0.111, 而横截面仅变化了 0.00687, 说明成形角对空洞(包含疏松)或裂纹的纵截面更敏感, 成形角的变化更有助于空洞(包含疏松)或裂纹的纵向扩展或闭合; 断面收缩率每变化一个单位变量, 空腔在纵截面的反应较剧烈, 表现在纵截面变化了 0.112, 而横截面仅变化了 0.0177, 说明断面收缩率对空洞(包含疏松)或裂纹的纵截面更敏感, 断面收缩率的变化更有助于空洞(包含疏松)或裂纹的纵向扩展或闭合.

由于轧件内部空洞的演化主要是横向闭合, 纵向扩展, 因此轧件内部空洞在纵截面的变化更受到关注. 由前面的分析可知: 展宽角对空洞扩展最重要, 其次是轧件的断面收缩率, 再次是成形角. 在仅考虑空洞(包含疏松)或裂纹的演化情况下设计楔横轧模具时, 展宽角是最重要的因素, 在其他参数可以变化的情况下, 尽量先选择展宽角的最佳尺寸, 使其对空洞(包含疏松)或裂纹不利, 其次是轧件的断面收缩率, 再次是成形角.

6 结论

(1) 楔横轧轧制带洞铝合金轧件时, 内部中心空洞变化的规律是: 球形—椭球形—内部贯通的孔腔. 多洞状态下, 内部非中心空洞变化的规律是: 球

形—椭圆形—被闭合。

(2) 楔入段的后期和展宽段的前期是内部空洞演化的关键阶段。在这一阶段, 空洞的横截面形状呈现多边形化, 出现被闭合现象, 尺寸变小; 但纵截面被迅速拉长, 出现轴向贯通的现象, 因此模具的楔入段不宜过长。在精整段, 内部孔隙不再有变化。

(3) 多洞状态下, 位于轧件心部的空洞最不容易闭合, 其余部位的空洞对中心空洞有正作用面的影响, 不会加深加大中心空洞的扩展, 反而起阻止变大的作用。小尺寸空洞比大尺寸空洞更容易闭合, 空洞越接近于表面越容易闭合, 非中心空洞不会发生轴向贯通现象。

(4) 在楔横轧的三个工艺参数中, 小的断面收缩率、成形角和展宽角均有利于轧件内部空洞的扩展。在这三个工艺参数中, 轧件内部空洞的演化对展宽角的变化较为敏感, 其次是断面收缩率, 再次是成形角。在仅考虑轧件内部空洞演化的情况下, 设计楔横轧模具时, 首先要考虑模具的展宽角, 其次是轧件的断面收缩率, 再次是模具的成形角。

参 考 文 献

- [1] Lü Y. *Forging Defect Analysis and Counter Measures*. Beijing: China Machine Press, 1999
(吕炎. 锻件缺陷分析与对策. 北京: 机械工业出版社, 1999)
- [2] Keife H, Stahlberg U. Influence of pressure on the closure during plastic deformation. *J Mech Work Technol*, 1980, 4(2): 133
- [3] Zhang X X, Cui Z S. Z-C criterion of void closure for large-ingot hot forging and its application. *Chin J Mech Eng*, 2009, 45(1): 148
(张效迅, 崔振山. 大锻件内部空洞热锻闭合的 Z-C 判据及其应用. 机械工程学报, 2009, 45(1): 148)
- [4] Ren Y L, Nie S M, Niu L J, et al. Healing conditions of large forgings internal voids defect. *Chin J Mech Eng*, 2008, 44(2): 248
(任运来, 聂绍珉, 牛龙江, 等. 大型锻件内部空洞缺陷修复条件. 机械工程学报, 2008, 44(2): 248)
- [5] Tanaka M, Ono S, Tsuneno M. A numerical analysis on void crushing during side compression of round bar by flat dies. *J Jpn Soc Technol Plast*, 1987, 28(314): 238
- [6] Han J T, Chen Z P, Li J K, et al. Effective forging and treating process of heavy forgings with inner cracks. *J Plast Eng*, 1996, 3(1): 20
(韩静涛, 陈志平, 李锦科, 等. 有效控制夹杂性裂纹的大型锻件锻造及处理方法. 塑性工程学报, 1996, 3(1): 20)
- [7] Zhu M, Jin Q L. The theory of core defects on closure of large forging process // *Proceedings of the Second National Symposium on Plasticity*. Hefei, 1988
(朱明, 金泉林. 大型锻件内部孔隙缺陷闭合过程的理论探讨 // 第二次全国塑性力学学术交流会议论文集. 合肥, 1988)
- [8] Ma Q X, Zhong Y X, Cao Q X. Study on the properties of cracks damage and recovery in high-temperature processes of plastic deformation. *J Plast Eng*, 2000, 7(2): 58
(马庆贤, 钟约先, 曹起骧. 高温塑性加工过程中裂纹损伤与修复特性研究. 塑性工程学报, 2000, 7(2): 58)
- [9] Stahlberg U. Influence of spread and stress on the closure of a central longitudinal hole in the hot rolling of steel. *J Mech Work Technol*, 1986, 13(1): 65
- [10] Cui Z S, Ren G S, Xu B Y, et al. Void closing conditions for solid cylinders during hot forging. *J Tsinghua Univ Sci Technol*, 2003, 43(2): 227
(崔振山, 任广升, 徐秉业, 等. 圆柱体内部空洞的热锻闭合条件. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43(2): 227)
- [11] Wallerö A. Closing of a central longitudinal pore in hot rolling. *J Mech Work Technol*, 1985, 12(2): 233